# 用电子枪和磁力仪测量磁场速度的方法

汤克云

中国科学院地质与地球物理研究所

kytang@mail.igcas.ac.cn

**摘 要**

“光速不变原理”是狭义相对论的最重要假设。根据爱因斯坦的科学法则，一切理论必须符合经验事实，因此，寻找一种可以准确测量电磁场或电磁波速度的实验方法，是物理学界的重大课题。本文提出一种用不同能量的电子束和沿不同方位设置的磁力仪测量磁场速度的实验方法，核心思想是设法找出激发磁场的电子与被激发磁场的对应时间。如果测得的传播速度差别都极小，就证明了电磁场的传播速度与源电荷及源电流的运动速度确实无关，“光速不变原理成立”，否则证明“光速不变原理不能成立”。

**关键词：** 电子枪，电子束，磁力仪，转折点，磁场速度，

光速不变原理

# The method to measure the speed of magnetic field with electron gun and magnetometer

Keyun Tang

Institute of geology and geophysics, Chinese academy of sciences

kytang@mail.igcas.ac.cn

Abstract

The principle of constancy of light speed is the most important hypothesis of special relativity. According to Einstein's scientific law, all theories must conform to empirical facts, therefore, to find an accurate experimental method to measure the speed of electromagnetic field or electromagnetic wave is a major subject in physics. This paper presents an experimental method to measure the speed of magnetic field by electron beams with different energies and magnetometers set in different orientations. The core idea is to find out the corresponding time intervals between the exciting electron and the excited magnetic field. If the measured the difference of the speed of magnetic field is very small, it proves that the velocity of electromagnetic field is indeed independent of the velocity of source charge and source current, the principle of the constancy of light speed is valid, otherwise it proves that the principle of the constancy of light speed is not valid.



**Key words:** electron gun, electron beam, magnetometer, turning point, speed of magnetic field, the principle of the constancy of light speed

## 一、需要对光速不变原理作出明确的判断

光速不变原理是狭义相对论最重要的基础[1]。可是，迄今为止，它仍是一个存在争议的假设。爱因斯坦明确指出：狭义相对论来源于

电动力学和光学，应归功于麦克斯韦的电磁学理论。可是，麦克斯韦的电磁学理论使用的是伽利略–牛顿时空，与狭义相对论使用的闵可夫斯基时空有巨大差别。根据爱因斯坦的科学法则，一切成熟的理论都必须符合经验事实，都必须符合公认的逻辑法则[1]。要对“光速不变原理”给出一个真实的明确判断，必须实施一种真实的实验，能测量出电磁场或电磁波的传播速度。本文提出：可用电子枪和磁力仪实施对磁场传播速度的测量。



## 二、测量电子束激发的磁场速度的基本思路

在一个足够大的平坦实验室内，将电子枪平置于地面，将电子束飞行的方向定义为 $X$ 轴的正方向，沿 $X$ 轴的正方向，在距离电子枪出口处的适当距离处分别设置三块探测板 $P,A,Q$，并在场内一点设置磁力仪 $M$。在探测板和磁力仪上，均带有铯原子钟提供的时间信号，如图 1。

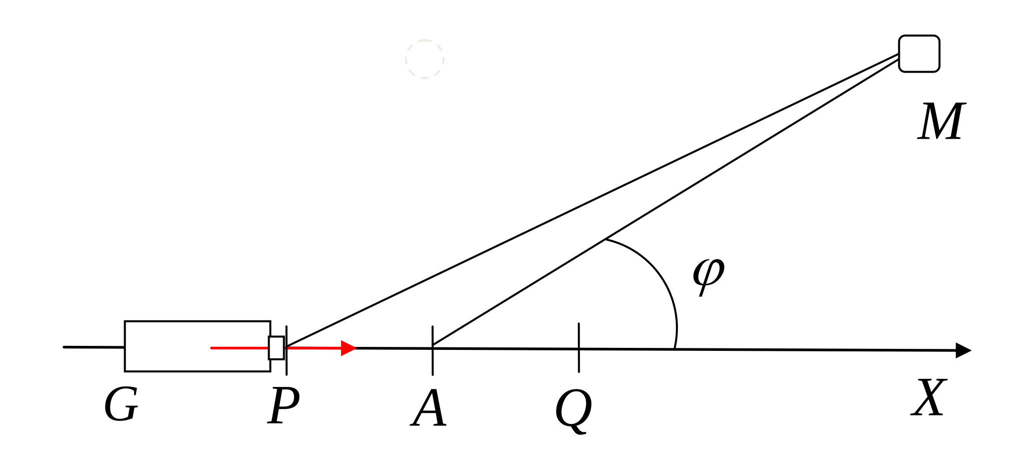



图 1　　实验仪器的基本配置

$GP$ 为电子枪，$P$ 为电子束出口，在 $P,A,Q$ 处分别设置三块探测板，在 $M$ 处设置一台磁力仪，矢径 $AM$ 与 $X$ 轴的夹角为 $\varphi$。探测板和磁力仪皆有铯原子钟提供精确的时间信号，有关仪器的配置如图所示。

我们的总体思路是：由探测板测量电子束到达探测板 $A$ 的时刻，由磁力仪测量相应的电子束所激发的磁场到达磁力仪 $M$ 的时刻，从而计算磁场速度。核心思想是设法找出激发磁场的电子与被激发磁场的对应时间。

根据毕奥-萨伐定律，在电流元的周围会产生磁场

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{r}}{r^3},\qquad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_l \frac{Id\vec{l}\times\vec{r}}{r^3} \tag{2.1}$$

磁场的方向是沿垂直于电子束且以电子束截面中心为圆心的圆环方向，即基矢 $\vec{e}_\varphi$ 的方向。

在本文中，磁力仪 $M$ 与第一块探测板 $P$ 及第二块探测板 $A$ 组成一个固定的三角形 $PAM$，如图 2 所示。

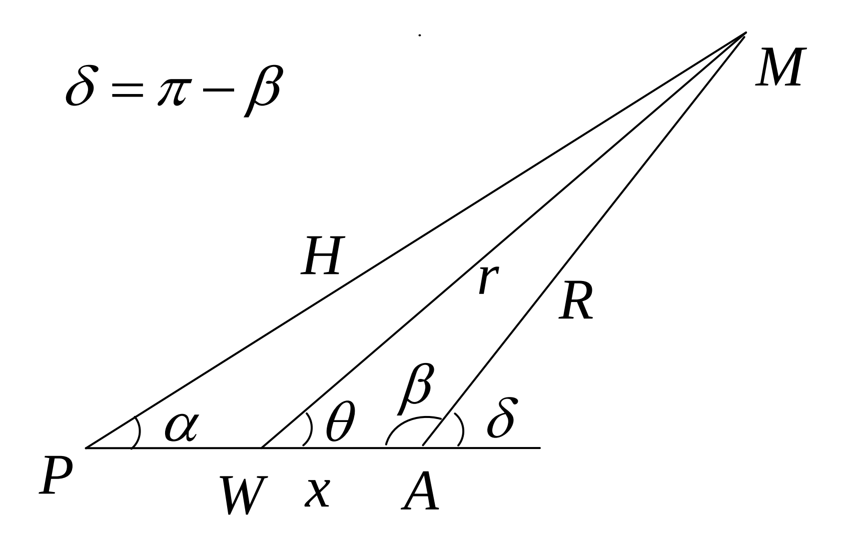



图 2　电子束与磁力仪的几何关系

其中，$W$ 为 $P$ 与 $A$ 之间的任意一点，$WA = x$。图中，$H = PM, R = AM, l = PA$ 都是确定的长度，$\alpha, \beta, \delta$ 都是确定的角度，仅有 $x, r, \theta$ 是变量。

磁场的强度为

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^L \frac{\sin\theta dx}{r^2} \tag{2.2}$$

在此积分式中，$l$ 是从 $P$ 点到 $A$ 点的长度。对以上被积式中的三个变量：$x, r, \theta$，可通过三角形 $WAM$ 内的正弦和余弦定律，化为只剩一个变量 $\theta$，办法是：

在三角形 $WAM$ 中，可用正弦定理求变量 $r = WM$ 的长度：

$$\frac{\sin\theta}{R} = \frac{\sin\beta}{r}$$

$$i.e. \tag{2.3}$$

$$r = \frac{\sin\beta}{\sin\theta} R$$

同样，在三角形$WAM$中，可用正弦定理将$x$化成$\theta$的函数：

$$\frac{\sin\theta}{R}=\frac{\sin[\pi-(\theta+\beta)]}{x},$$

$$\begin{aligned}x&=\frac{\sin(\theta+\beta)}{\sin\theta}R\\&=\frac{\sin\theta\cos\beta+\cos\theta\sin\beta}{\sin\theta}R\\&=\cos\beta R+\cot\theta\sin\beta R\\dx&=\sin\beta R(-\csc^2\theta)d\theta\\&=-\sin\beta R\csc^2\theta d\theta\end{aligned}\tag{2.4}$$

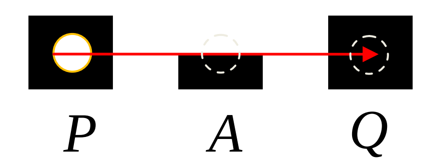
将（2.3）和（2.4）代入（2.2），得

$$\begin{aligned}B&=\frac{\mu_0}{4\pi}I\int_0^L\frac{\sin\theta dx}{r^2}\\&=\frac{\mu_0}{4\pi}I\int_0^L\frac{\sin^3\theta dx}{\sin^2\beta R^2}(-\sin\beta R\csc^2\theta d\theta)\\&=-\frac{\mu_0}{4\pi}I\int_\alpha^\delta\frac{\sin^3\theta dx}{\sin\beta R}(\frac{1}{\sin^2\theta}d\theta)\\&=-\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_\alpha^\delta\frac{\sin\theta d\theta}{\sin\beta R}\\&=\frac{\mu_0 I}{4\pi\sin\beta R}(\cos\delta-\cos\alpha)\end{aligned}\tag{2.5}$$

计算磁场之强度，不是本文的重点；但是，能够计算电子枪发射的电子束激发的磁场之强度，对于检验磁力仪记录到的磁场数据，可能有帮助。

## 三、特殊的探测板与电子通量的转折点

在上一节，我们已经说明，要在距离电子枪出口处适当距离处设置三块探测板$P,A,Q$，它们的共同任务是分别记录电子到达探测板的精确时刻。现在，分别阐明各探测板的不同结构和用途，如图 3：



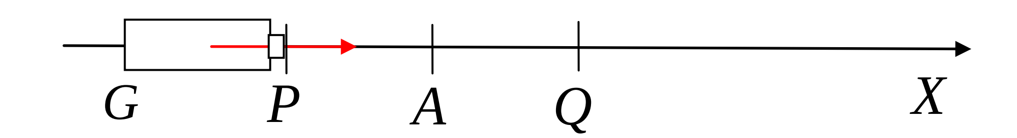




图 3　电子枪，电子束与三块探测板的相对位置及形状。

1. 第一块探测板 $P$，设置于电子枪的出口处 $P$，中间留有圆孔，除少量用于测量到达时刻的电子，可让电子束的绝大多数电子通过；
2. 第二块探测板位于 $A$ 点，与第一块探测板的距离为 $PA=l$，这是半块金属片，可阻止电子束 50%的电子通过，此处成为电子通量的转折点，由此可获得准确的转折点时间。此外，探测板邻近磁力仪的一侧缺失，可保证在的整个过程中，由这一侧的电子束的电子不被；
3. 第三块探测板位于 $Q$ 点，与第二块探测板的距离为 $d$，这是一块完整的金属片，阻止任何电子通过。

## 四、到达磁力仪磁场的转折点

既然位于 $A$ 点的第二块探测板成为电子通量的转折点，相应地，由此处的电子激发并传播至磁力仪的磁场波形也必然出现相应的转

折点。

如此设计和安置的探测板，使得从电子枪射出并穿过第一块探测板中心圆孔的电子，即 $PA$ 之间的电子数量随时间增加，电子激发的磁场也随时间增强；当电子束遇到第二块探测板，多数电子被阻挡，穿过第二块探测板的电子数目突然减少，电子激发的磁场也突然变弱；当电子束遇到第三块探测板，全部电子被阻挡，电子激发的磁场也突然消失。



对于不同阶段，电子束的电子数目随时间变化，如图 4。

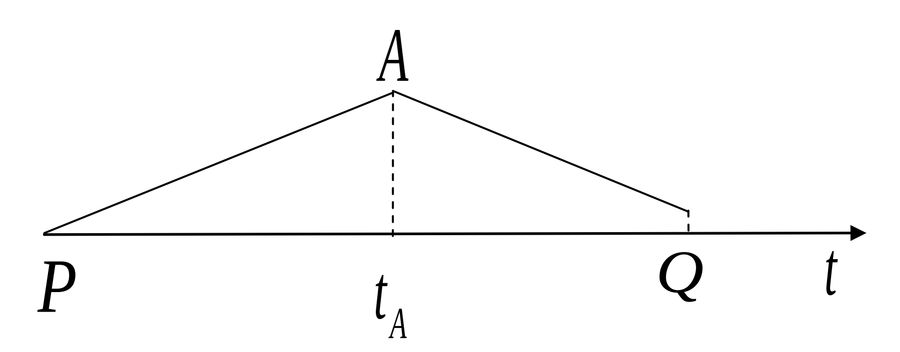



图 4. 在 $PQ$ 之间，不同阶段的电子数目与三块探测板的关系在第二块探测板电子束的电子数目突然减少，形成了一个特殊的转折点。电子到达探测板的时刻为 $t_A$。

对于不同阶段，由于电子束中的电子数目的变化，由电子束激发的磁场强度也发生相应的变化，磁力仪记录到的磁场强度的变化趋势与图 4 类似，如图 5。

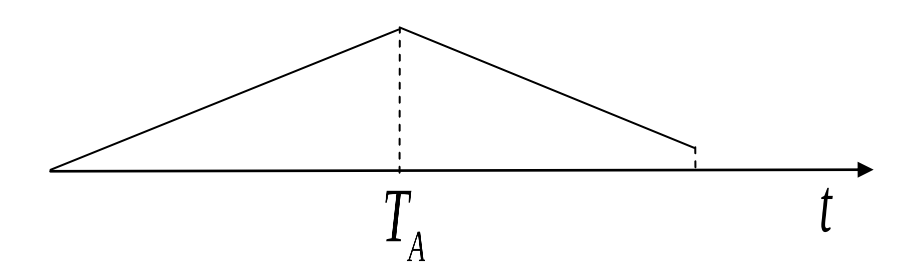



图 5. 磁力仪记录到的磁场强度变化示意图.

也出现一个对应的转折点， 从而建立起源电子与被激发磁场之间的联系。由$t_A$时刻到达探测板$A$的电子激发的磁场，于$T_A$时刻到达磁力仪。



至此，我们已经知道：在磁力仪的记录上，转折点的时间是$T_A$，此时刻的磁场是时刻$t_A$的电子激发的。据此，可以根据磁力仪$M$与探测板$A$的距离$H$，磁场从探测板$A$传播到磁力仪$M$的时间间隔来计算磁场传播的速度

$$V_{mag} = \frac{H}{T_A - t_A} \tag{4.1}$$

这是计算磁场传播速度的基本公式；对于不同能量的电子束，对于不同方位的磁力仪，都按这个公式计算。

## 五、用两台不同方位的磁力仪测量磁场的传播速度

如图 3。 从$A$点计，在与$X$轴的夹角分别为$\varphi_1, \varphi_2$且与$A$点的距离皆为$H$的二处，设置两套完全相同的磁力仪$M_1$和$M_2$，并配置由铯原子钟提供的时间信号，电子枪与二套磁力仪的关系如图 6 所示。

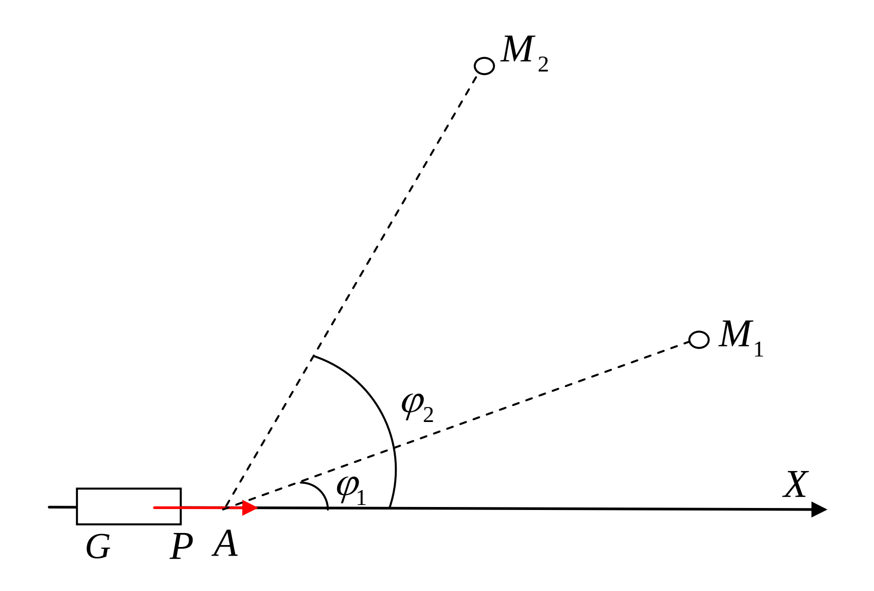



图 6　　电子枪，电子束，特殊探测板与磁力仪的相对位置

图 6 中，$GP$ 是电子枪。沿电子束的运动方向，设置三个位置确定的探测板，均可准确记录电子到达各探测板的时间，三块探测板的具体结构在下一节详述。在与电子束的夹角分别为$\varphi_1$和$\varphi_2$的方向，且与电子枪距离相等处设置两台完全相同的磁力仪$M_1$和$M_2$，并由同一台铯原子钟为两台磁力仪提供时间信号。

**电子束的整体运动方向是沿** $X$ 轴正**方向，是不变的；对不同方位的磁力仪，存在一个相对的**对两个磁力仪，分别计算出磁场的传播速度。如果从两个磁力仪计算出的磁场速度相差极小，证明磁场的传播是各向同性的，否则，电子束的运动方向成为一个特殊的方向，光速不变原理不成立。

**六、对不同能量的电子束重复以上实验**

选择一定的能量$E_n$，激发电子束，沿 X 轴正方向发射；电子束的速度为

$$E_n = \frac{1}{2} m_0 V_n^2, \quad V_n = \sqrt{\frac{2E_n}{m_0}} \tag{6.1}$$

改变了电子束的能量，就改变了电子束的速度。

重复以上实验。对不同速度的电子束，如果测量出的磁场传播速度差别极小，证明磁场的传播速度与源电荷的运动速度无关。光速不变原理成立，否则，光速不变原理不成立！

## 七、讨论

爱因斯坦本人在提出狭义相对论和广义相对论后不久，在《狭义与广义相对论浅说》中十分肯定地说：狭义相对论是从电动力学和光学发展出来的。在电动力学和光学领域，狭义相对论对理论的预料并未作多少修改；但狭义相对论大大简化了理论的结构。

他又非常明确地指出：狭义相对论的起源要归功于麦克斯韦的电磁学理论。可是，真空中的麦克斯韦方程组包括四个方程

$$\begin{aligned} &\nabla \bullet \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \\ &\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \\ &\nabla \bullet \vec{B} = 0, \\ &\nabla \times \vec{B} = 4\pi \vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \tag{7.1}$$

依次是高斯定律，安培定律，不存在单个磁极子的无散方程，以及法拉第电磁感应定律，这四个方程都是在源-观相对静止条件下根据大

量实验结果导出的方程。

上述麦克斯韦方程组中的常数‘c’被理解为真空中的电磁场速度。我们特别强调：既然麦克斯韦方程组是源观相对静止条件下的方程，那么，这里的电磁场速度也只能理解为是在源-观相对静止条件下的速度。

根据爱因斯坦强力推崇的麦克斯韦电磁学理论，对‘光速不变原理’的全面、正确和合理的理解应当是：“在任何真空实验室中，只要源-观之间保持相对静止，无论这个实验室是在哪个星体上，无论整个实验室的绝对运动速度多大，电磁场的传播速度都是相同的。”

如此完整、准确地理解麦克斯韦方程、达朗贝尔波动方程，才是自然而真实的，符合公认的逻辑法则的，不需要引进任何奇怪难解的假设。

根据这样的理解，可以预期：只有在源-观相对静止的条件下，才会出现‘电磁场传播速度各向同性’的结果。

按照本文的实验方案，电子束对磁力仪应有相对速度。我们预期：测量出的磁场传播速度应当有差别，与电子束的速度有关。

无论出现与当代教科书一致或不一致的测量结果，都是一次重大的科学实践。 它将大大推动科学界的思考和质疑。无论如何，通过不懈的实验、思考和质疑，寻找出那个真实、自然而合理的电磁场传播速度是物理学界的一个伟大的科学目标。

**参考文献**

[1].爱因斯坦,狭义与广义相对论浅说,北京大学出版社,2006.1,北京.

[2].J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.

[3].胡友秋 程福臻 叶邦角 刘之景，电磁学与电动力学（上册），科学出版社，2014.6，第二版，北京.

[4].胡友秋 程福臻，电磁学与电动力学（下册），科学出版社，2014.6，第二版，北京.

[5].俞允强，电动力学简明教程，北京大学出版社，1999.7，北京.

[6].郭硕鸿，电动力学（第二版），高等教育出版社，1997.7，北京.

[7].刘辽，费保俊，张允中，狭义相对论，科学出版社，2008.7，北京.